

УДК 539.3

Э.А. СИМСОН, д-р. техн. наук, *С.А. НАЗАРЕНКО*, канд. техн. наук,

А.Ю. ЗЮЗИН, С.И. МАРУСЕНКО, НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

ПРОБЛЕМЫ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ. CFD-АНАЛИЗ

В статті пропонуються методи оптимізації складних скінченноелементних моделей з високим ступенем геометричної і фізичної інформативності; орієнтовані на мінімальну кількість звертань до процедури прямого розрахунку. Досліджено обчислювальні етапи.

Structural optimization methods of high both geometric and physical informational content are suggested for complicated FEA models, especially with design variables vector of high dimension, to minimize numbers of straight calculation procedure activation. Computational stages are investigated. The developed mathematical apparatus application are examined.

В статье рассматриваются проблемы мультидисциплинарной оптимизации элементов конструкций, ориентированной на большое число варьируемых параметров с высоким степенем адекватности реальным процессам. Решена задача CFD-анализа в трехмерной постановке.

В условиях рыночной экономики, когда сама разработка конструкции в силу средств, затрачиваемых на НИР, ОКР, технологическую подготовку к серийному производству может оказаться нерентабельной в сравнении с достигаемым эффектом, необходимо интегрирование моделей и критериев качества рабочих характеристик и топливно-энергетической эффективности проектируемых машин - с одной стороны, показателей прочности и надежности - с другой, технологичности - с третьей, в единые критерии качества и рентабельности серийного производства в условиях конкурентного рынка. Разработка систем автоматизированного оптимального проектирования

связана с применением теории и численных методов оптимизации для реальных задач проектирования, отличающихся необходимостью использования комплексных моделей функционирования изделия, сложной пространственной геометрией конструкции, большим количеством критериев и функциональных ограничений[1,2].

Задача оптимизации машиностроительных конструкций заключается в нахождении параметров проектирования, принадлежащих допустимой области U и минимизирующих (максимизирующих) целевую функцию (функционал качества) J_0 . На проектные переменные могут накладываться как явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений, так и функциональные ограничения типа равенств и неравенств, наложенных на функционалы J_j , неявным образом сужающие область варьирования. При этом значения функционалов определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния метода конечных элементов (МКЭ), являющегося наиболее мощным и распространенным методом расчета конструкций. Большинство описанных в литературе постановок решенных задач оптимизации связано с проблемой предельного снижения веса или его аналогов при обеспечении статической прочности[1,2].

Разрабатываемые авторами методы оптимального проектирования должны иметь следующие особенности:

- комплексное математическое моделирование конструкций, включающее описание геометрических, гидрогазодинамических, прочностных, вибрационных, температурных характеристик;
- высокую степень адекватности реальным процессам;
- использование методов и алгоритмов оптимизации, ориентированных на большое число варьируемых параметров;
- оптимизацию по критериям основных рабочих характеристик.

При решении практических задач, характеризующихся высокой размерностью (порядка 100-1000) вектора варьируемых параметров и весьма большим (~ 10) числом функциональных ограничений, в настоящее время наиболее предпочтительным представляется метод последовательной линеаризации (МПЛ).

На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов:

- решение исходной и сопряженной задач;
- вычисление функциональных производных или градиентов от критериев и функциональных ограничений по проектным переменным [3];
- построение области линеаризации;
- решение задачи линейного программирования.

Выбор способа дискретизации и типов проектных переменных, критерия качества и функциональных ограничений производится в зависимости от назначения конструкции, ее расчетной модели и других факторов. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка имеет вид

$$\begin{aligned} \min \delta \bar{u}^T \vec{\nabla}_u J_0 \\ J_j + \delta \bar{u}^T \vec{\nabla}_u J_j &= 0 \\ \bar{u} + \delta \bar{u} &\in \delta U \cap U \end{aligned} \quad (1)$$

Наличие J_j в линеаризованной записи функциональных ограничений $J_j(\bar{u}, \bar{y}) = 0$ связана с компенсацией накопления погрешностей второго порядка малости. Область линеаризации образуется пересечением области δU , строящейся по характеру изменения (градиентам) целевой функции J_0 и функционалов - ограничений J_j , и допустимой области U , рассматриваемой в работе в виде гиперпараллелепипеда: $u_i^- \leq u_i \leq u_i^+$, $i = \overline{1, n}$. В дальнейшем при описании метода будем придерживаться системы обозначений

$$s_i = \delta u_i; \quad h_i^j = \frac{\partial J_j}{\partial u_i}; \quad X^j = J_j(\vec{u}, \vec{y}).$$

Первые два условия в постановке (1) с учетом принятой системы обозначений примут вид

$$\min \sum_{i=1}^n s_i h_i^0, X^j + \sum_{i=1}^n s_i h_i^j = 0. \quad (2)$$

Область линеаризации будем также разыскивать в форме гиперпараллелепипеда $s_i^- \leq s_i \leq s_i^+$.

Возможности разработанного математического аппарата продемонстрируем на примере лопатки радиально-осевой турбины, которая моделировалась трехмерными изопараметрическими КЭ (рис.1).

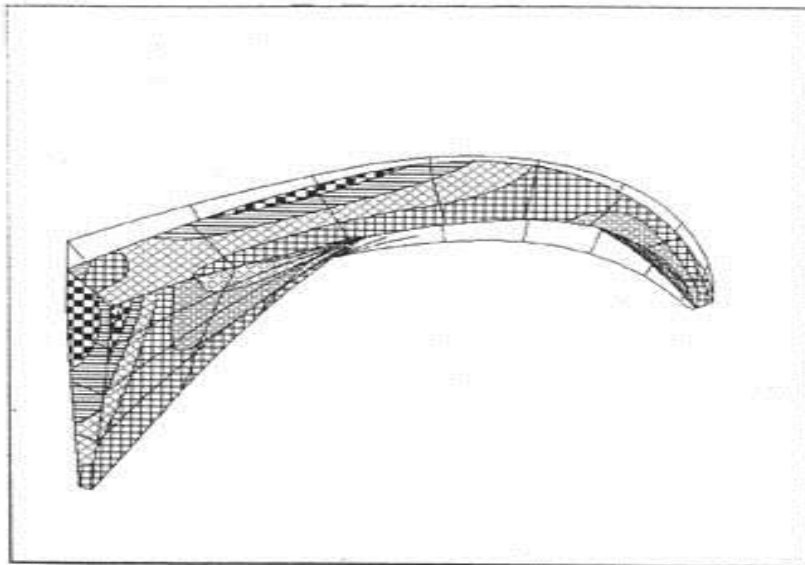


Рис.1. Поле приращений материала при решении задачи максимизации основной собственной частоты лопатки рабочего колеса турбины ТКР-8.5-ТВ.

Оптимизация связана с трехмерным КЭ варьированием распределением толщины лопатки, формой серповидной направляющей и трассировкой образующей (в рамках различных ограничений, диктуемых уровнем реальных технологических возможностей завода-изготовителя). При оптимизации использовались как схемы варьирования элементами срединной поверхности и "технологичного" распределения толщины, так

и отдельные вариации Безье-поверхностей спинки и корытца. При этом удастся отстроить от опасных резонансов пакет собственных частот, соответствующих первой лопаточной форме, и поднять в область высоких гармоник пакет частот, соответствующих второй.

При проектировании многих конструкций гидроаэродинамика заслуженно рассматривается как приоритетное направление. Знание гидро- и аэродинамических характеристик отдельных элементов быстроходной яхты необходимо для моделирования ее движения и оптимизации проекта по критерию ходовых качеств. Рассмотрим обтекание модели киля ламинарным потоком несжимаемой жидкости (рис.2).

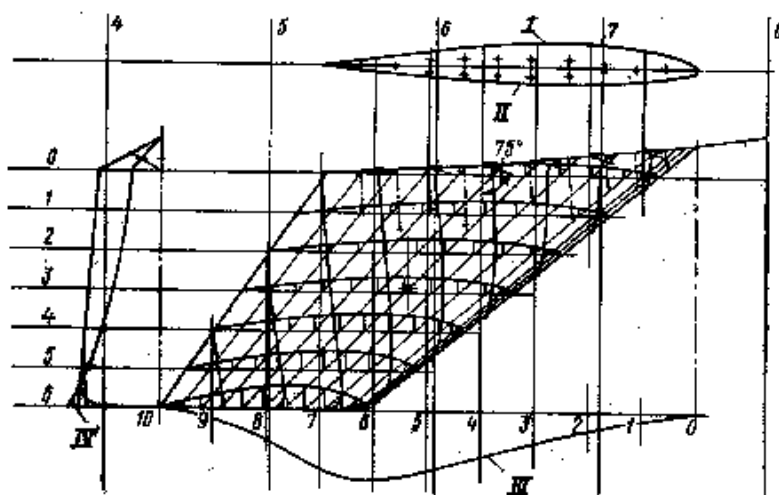


Рис.2.Теоретический чертеж киля: I-фланец киля, II-рыбина 75 градусов, III-строевая по шпангоутам, IV-строевая по ватерлиниям

Определим распределение давления по поверхности киля и распределения скоростей жидкости в приграничном слое.

Для решения данной задачи необходимо записать уравнение Навье-Стокса для движения вязкой несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = f_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3),$$

где $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – так называемый кинематический коэффициент вязкости. Эти

уравнения следует дополнить уравнениями неразрывности и состояния. При решении данной задачи на основе трехмерной конечноэлементной модели были получены следующие результаты (рис.3, 4).

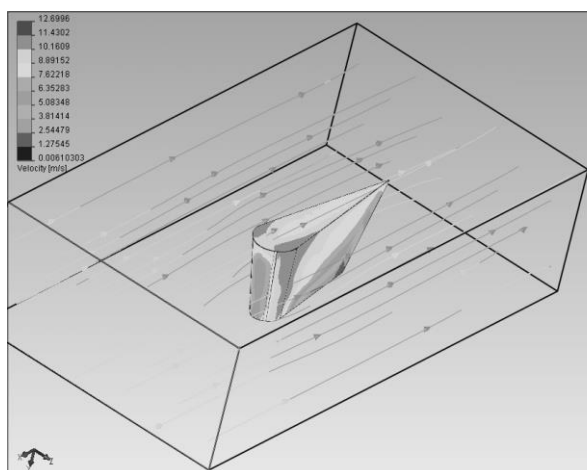


Рис.3. График линий тока и
распределения скоростей

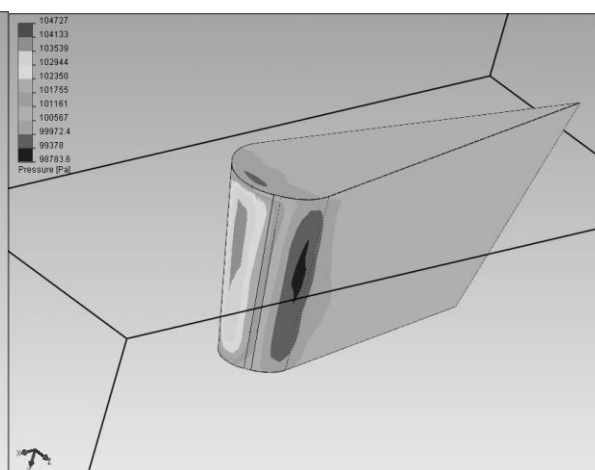


Рис. 4. Распределение давлений по
поверхности кия

жидкости в приграничном слое

В дальнейших работах планируется адаптация методов анализа чувствительности и оптимизации к проектированию систем с учетом их гидрогазодинамических характеристик

Список литературы: 1. Гриценко Г.Д, Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем// Механіка та машинобудування. 2002. №1.-С. 6-13 с. 2. Fridman M.M., Zyczkowski M. Structural optimization of elastic columns under stress corrosion conditions//Structural Optimization. 2001. vol. 21(3). p.218-228. 3. Симсон Э.А ., Назаренко С.А. Зюзин, А.Ю., В.Б. Любецкая В.Б. Анализ чувствительности для конечноэлементных моделей конструкций // Вестник НТУ «ХПИ». 2003. № 8. Т. 3. С. 77-82. 4. Самойлович Г.С.. Гидрогазодинамика. М. Машиностроение, 1990.-358 с.

Поступила в редколлегию 05.11.04